



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ: ΕΜΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ &
ΒΙΟΙΑΤΡΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ

ROBOT HANDS WITH APPLICATION TO
PROSTHESES

Advisor:

Prof. Leonidas G. Alexopoulos

Author:

Kontoudis George

In the:

Department of Mechanical Design & Automatic Control

School of Mechanical Engineering

January 2015

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το ανθρώπινο χέρι θεωρείται ως το ανώτερο άκρο που υπάρχει καθώς συνδυάζει πολλά χαρακτηριστικά όπως υψηλή επιδεξιότητα, αντοχή, ενεργητική καθώς και παθητική υποχωρητικότητα, αισθητική εμφάνιση και πολλά άλλα. Επίσης, παρέχει πληθώρα πληροφοριών με χαρακτηριστικά στοιχεία την μορφή, την τραχύτητα, το βάρος και το κέντρο βάρους των αντικειμένων που αλληλεπιδρά. Εκτιμάται πως τα Άτομα με Αναπηρία (ΑμεΑ) που παρουσιάζουν ακρωτηριασμένο άνω άκρο ανέρχονται σε 11,4 εκατομμύρια παγκοσμίως. Τις τελευταίες δεκαετίες έχουν αναπτυχθεί αρκετά ρομποτικά χέρια με σκοπό την εφαρμογή τους σε άτομα με αναπηρία προκειμένου να τους βοηθήσουν να επανακτήσουν μέρος της χαμένης επιδεξιότητάς τους.

Στην παρούσα εργασία θα παρουσιάσουμε πληθώρα ρομποτικών χεριών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως προσθετικά μέλη. Η ανασκόπηση περιλαμβάνει τα πιο διαδεδομένα ρομποτικά χέρια που κατασκευάζονται από ιδιωτικές εταιρείες αλλά και ρομποτικά χέρια που μελετώνται από Πανεπιστήμια για ερευνητικούς σκοπούς.

Στην συνέχεια, θα εξηγήσουμε τα μειονεκτήματα των εμπορικών ρομποτικών χεριών. Η ανάγκη για την μείωση του κόστους, του βάρους, της αντοχής αλλά κυρίως της επιδεξιότητας των ρομποτικών χεριών έχει οδηγήσει τους ερευνητές στην δημιουργία μιας νέας κατηγορίας ρομποτικών χεριών. Αυτή η κατηγορία είναι τα υποεπενεργούμενα ρομποτικά χέρια που έχουν λιγότερους επενεργητές σε σχέση με τους βαθμούς ελευθερίας.

Αφού ολοκληρωθεί η κατασκευή του ρομποτικού χεριού και προκειμένου να χρησιμοποιηθεί ως προσθετικό μέλος πρέπει να εξασφαλιστεί η αλληλεπίδραση του ρομποτικού χεριού με τον χρήστη. Έτσι, στο τελευταίο μέρος της εργασίας, θα παρουσιάσουμε τους τρόπους που επιτυγχάνεται η αλληλεπίδραση στα εμπορικά ρομποτικά χέρια αλλά και τις κατευθύνσεις των ερευνητικών ιδρυμάτων, Πανεπιστημίων.

Περιεχόμενα

1. Ανασκόπηση Ρομποτικών Χεριών	4
1.1 Ανθρώπινο Χέρι	4
1.1.1 Βάρος Χεριού	4
1.1.2 Διαστάσεις χεριού	5
1.1.3 Αριθμός αρθρώσεων και βαθμοί ελευθερίας	5
1.2 Εμπορικά Ρομποτικά Χέρια	6
1.2.1 Bebionic v2	7
1.2.2 iLimb Ultra	8
1.2.3 Vincent Hand	9
2. Υποεπενεργούμενα χέρια	11
2.1 Υποχωρητικότητα	11
2.1.1 Παθητική υποχωρητικότητα	12
2.1.2 Παθητική υποχωρητικότητα εμπνευσμένη από την βιολογία	12
2.2 Υποεπενεργητικότητα	13
2.2.1 Υποεπενεργούμενα χέρια	15
2.2.1.1 Ανθρωπομορφικό χέρι Yale University	15
2.2.1.2 Μη-ανθρωπομορφικό χέρι Model-T Yale University	16
2.2.1.3 Ανθρωπομορφικό χέρι του Laval University	17
2.2.1.4 Μη-ανθρωπομορφικό χέρι του ΕΜΠ	18
3. Αλληλεπίδραση Ανθρώπου-Ρομπότ (HRI)	20
3.1 Αρχή λειτουργίας ηλεκτρομυογραφικού σήματος	20
3.2 Ηλεκτρομυογραφικά ηλεκτρόδια	21
3.3 Μειονεκτήματα ηλεκτρομυογραφικών διεπαφών και τρόποι αντιμετώπισης	22
Βιβλιογραφία	24

1. Ανασκόπηση Ρομποτικών Χεριών

1.1 Ανθρώπινο Χέρι

Το ανθρώπινο χέρι θεωρείται το τελειότερο άκρο στον κόσμο λόγω κάποιων συγκεκριμένων χαρακτηριστικών του. Για να μπορέσουμε να συγκρίνουμε τις ικανότητες του ανθρώπινου χεριού με τα εμπορικά προσθετικά μέλη περιγράφουμε παρακάτω κάποια χαρακτηριστικά του.



Εικόνα 1: Ανθρώπινο χέρι

1.1.1 Βάρος Χεριού

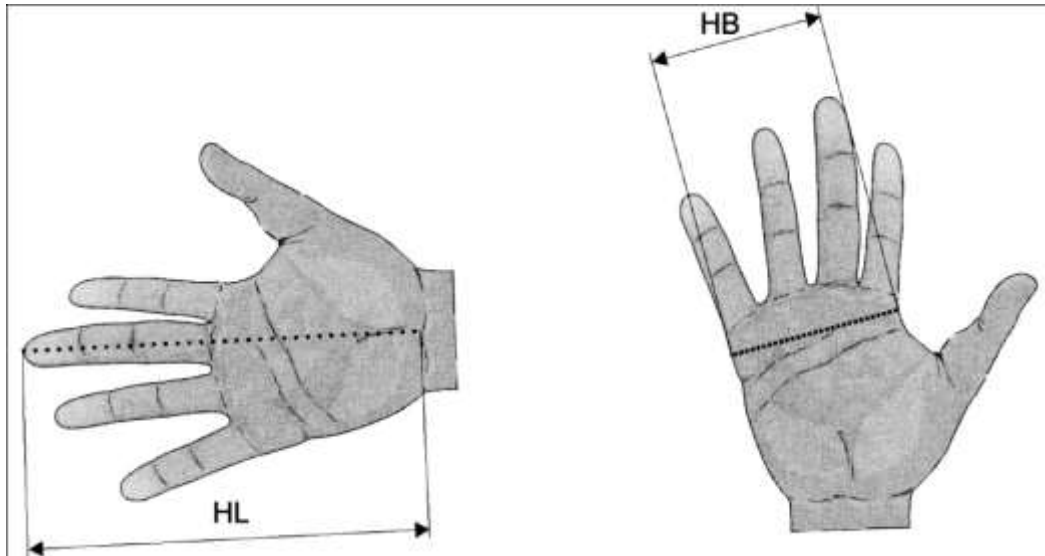
Το ανθρώπινο χέρι από τον καρπό και έπειτα, χωρίς να υπολογίζονται οι εκτεινόμενοι μυς του πήχη, ζυγίζει, κατά μέσο όρο, 400gr. Όμως τα προσθετικά μέλη με παρόμοιο βάρος χαρακτηρίζονται από τους χρήστες ως πολύ βαριά, πιο συγκεκριμένα μετά από έρευνα μυοηλεκτρικών προσθετικών μελών οι χρήστες κατά 79% χαρακτήρισαν το προσθετικό τους μέλος ως «πολύ βαρύ». Πολύ σημαντικός παράγοντας για την αίσθηση του βάρους είναι ο τρόπος πρόσδεσης των προσθετικών μελών στο άνω άκρο των ανθρώπων. Το βάρος του προσθετικού μέλους επιβαρύνει αρκετά τους χρήστες, με αποτέλεσμα να μην μπορούν να το χρησιμοποιήσουν όλη την διάρκεια της ημέρας. Παρόλο που οι ερευνητές κινούνται στην κατεύθυνση δημιουργίας ολοκληρωμένων λύσεων στον τρόπο πρόσδεσης, θεωρείται δεδομένο πως η ελάφρυνση του προσθετικού μέλους θα προσδώσει μεγαλύτερη αντοχή στην κόπωση του χρήστη.

Δεν υπάρχει συγκεκριμένος περιορισμός σχετικά με το μέγιστο βάρος που πρέπει να έχει ένα προσθετικό μέλος. Αξίζει να αναφέρουμε πως κάποιες έρευνες προτείνουν μέγιστο βάρος

χεριού 400gr, άλλες θέτουν ως προαπαιτούμενο το σύνολο του χεριού συμπεριλαμβανομένου του ανθρωπομορφικού γαντιού να μην υπερβαίνει τα 370gr και τέλος άλλες ομάδες ορίζουν ως επιτρεπτό όριο βάρους τα 500gr [1].

1.1.2 Διαστάσεις χεριού

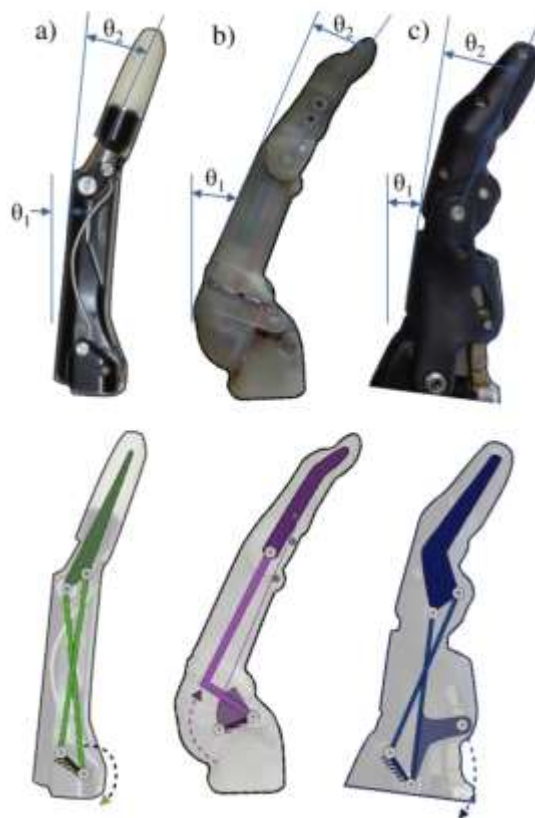
Η δημιουργία ενός ανθρωπομορφικού προσθετικού μέλους πρέπει να καλύπτει την πλειοψηφία των διαστάσεων του ανθρώπινου χεριού. Για αυτό οι περισσότεροι κατασκευαστές προσθετικών μελών διαθέτουν χέρια με διάφορες διαστάσεις. Η παραμετροποίηση βασίζεται σε μελέτες ανατομίας που προσδιορίζουν πως το ανθρώπινο χέρι προσεγγίζεται με 2 παραμέτρους ακολουθώντας κανονική κατανομή. Οι παράμετροι αυτοί είναι το μήκος και το πλάτος του χεριού.



Εικόνα 2: Βασικές διαστάσεις χεριού

1.1.3 Αριθμός αρθρώσεων και βαθμοί ελευθερίας

Θα δούμε παρακάτω πως στο σύνολο των εμπορικών προσθετικών μελών ο αριθμός των αρθρώσεων είναι μεγαλύτερος από τους βαθμούς ελευθερίας. Σε ρομποτικά συστήματα όπου η κίνηση επιτυγχάνεται με τένοντες, οι αρθρώσεις ακολουθούν μια συζευγμένη κίνηση η οποία εξαρτάται μόνο από την θέση του επενεργητή. Έτσι σε περίπτωση, που η θέση του επενεργητή ορίζει ακριβώς την γωνία των συζευγμένων αρθρώσεων θεωρούμε πως έχουμε 1 βαθμό ελευθερίας. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι τα δάχτυλα που χρησιμοποιούνται σε προσθετικά μέλη.



Εικόνα 3: Μηχανισμοί tendon routing δαχτύλων εμπορικών χεριών

1.2 Εμπορικά Ρομποτικά Χέρια

Υπάρχουν πολλές επιλογές ρομποτικών χεριών, για ένα άτομο με αναπηρία στο άνω άκρο, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως προσθετικά μέλη. Στην παρούσα εργασία, θα αναλύσουμε τα πιο διαδεδομένα. Αυτά είναι τα:

- Bebionic v2 της RSL Steeper
- iLimb της Touch Bionics
- Vincent Hand της Vincent Systems



Εικόνα 4: Εμπορικά ρομποτικά χέρια που χρησιμοποιούνται ως προσθετικά μέλη

1.2.1 Bebionic v2

Το Bebionic κατασκευάζεται από την RSL Steeper στο Leeds της Αγγλίας. Το συνολικό του βάρος κυμαίνεται μεταξύ 495-539gr και οι διαστάσεις του είναι οι ακόλουθες:

- Μήκος Χεριού: 190-200mm
- Πλάτος χεριού: 84-92mm
- Πάχος χεριού: 50mm

Το εύρος διαστάσεων οφείλεται στην προσπάθεια του κατασκευαστή να δημιουργήσει προσθετικά μέλη παρόμοιων διαστάσεων με το μη-ακρωτηριασμένο άκρο.

Ο αριθμός των αρθρώσεων του προσθετικού μέλους είναι 11, οι βαθμοί ελευθερίας είναι 6 και χρησιμοποιεί 5 επενεργητές. Η μεσαία φάλαγγα κάθε δαχτύλου είναι ενιαία με την ονυχοφόρα, έτσι για τον δείκτη, μέσο, παράμεσο και μικρό οι αρθρώσεις του ρομποτικού χεριού 8 αντί για 15 του ανθρώπινου χεριού. Ο αντίχειρας αντιτίθεται μηχανικά στην θέση που επιθυμεί ο χρήστης και έχει 2 αρθρώσεις για κάθε φάλαγγα. Έπειτα, δεδομένου ότι ο χρήστης μπορεί να ελέγξει μυοηλεκτρικά κάθε δάχτυλο ξεχωριστά και να επιλέξει την αντίθεση του αντίχειρα θεωρούμε πως έχει 6 βαθμούς ελευθερίας. Τέλος, οι επενεργητές είναι κινητήρες συνεχούς ρεύματος και αντιστοιχούν στην κίνηση του κάθε δαχτύλου [2].



Εικόνα 5: BeBionic

1.2.2 iLimb Ultra

Το iLimb Ultra κατασκευάζεται από την Touch Bionics στο Livingston της Σκωτίας. Το συνολικό του βάρος κυμαίνεται μεταξύ 460-465gr και οι διαστάσεις του είναι οι ακόλουθες:

- Μήκος Χεριού: 180-182mm
- Πλάτος χεριού: 75-80mm
- Πάχος χεριού: 35-41mm

Το εύρος διαστάσεων οφείλεται στην προσπάθεια του κατασκευαστή να δημιουργήσει προσθετικά μέλη παρόμοιων διαστάσεων με το μη-ακρωτηριασμένο άκρο.

Ο αριθμός των αρθρώσεων του προσθετικού μέλους είναι 11, οι βαθμοί ελευθερίας είναι 6 και χρησιμοποιεί 5 επενεργητές. Η μεσαία φάλαγγα κάθε δαχτύλου είναι ενιαία με την ονυχοφόρα, έτσι για τον δείκτη, μέσο, παράμεσο και μικρό οι αρθρώσεις του ρομποτικού χεριού 8 αντί για 15 του ανθρώπινου χεριού. Ο αντίχειρας αντιτίθεται μηχανικά στην θέση που επιθυμεί ο χρήστης και έχει 2 αρθρώσεις για κάθε φάλαγγα. Έπειτα, δεδομένου ότι ο χρήστης μπορεί να ελέγξει μυοηλεκτρικά κάθε δάχτυλο ξεχωριστά και να επιλέξει την αντίθεση του αντίχειρα θεωρούμε πως έχει 6 βαθμούς ελευθερίας. Τέλος, οι επενεργητές είναι κινητήρες συνεχούς ρεύματος και αντιστοιχούν στην κίνηση του κάθε δαχτύλου [3].



Εικόνα 6: iLimb Ultra

1.2.3 Vincent Hand

Το Vincent Hand κατασκευάζεται από την Vincent Systems στην Karlsruhe της Γερμανίας.

Ο αριθμός των αρθρώσεων του προσθετικού μέλους είναι 11, οι βαθμοί ελευθερίας είναι 6 και χρησιμοποιεί 6 επενεργητές. Η μεσαία φάλαγγα κάθε δαχτύλου είναι ενιαία με την ονυχοφόρα, έτσι για τον δείκτη, μέσο, παράμεσο και μικρό οι αρθρώσεις του ρομποτικού χεριού 8 αντί για 15 του ανθρώπινου χεριού. Ο αντίχειρας αντιτίθεται μυοηλεκτρικά στην θέση που επιθυμεί ο χρήστης και έχει 2 αρθρώσεις για κάθε φάλαγγα. Έπειτα, δεδομένου ότι ο χρήστης μπορεί να ελέγξει μυοηλεκτρικά κάθε δάχτυλο ξεχωριστά και να επιλέξει την αντίθεση του αντίχειρα θεωρούμε πως έχει 6 βαθμούς ελευθερίας. Τέλος, οι επενεργητές είναι κινητήρες συνεχούς ρεύματος και αντιστοιχούν στην κίνηση του κάθε δαχτύλου καθώς και στην αντίθεση του αντίχειρα [4].



Εικόνα 7: Vincent Hand

2. Υποεπενεργούμενα χέρια

Τα εμπορικά ρομποτικά χέρια παρουσιάζουν πάρα πολλά μειονεκτήματα κάποια από αυτά είναι:

- Η πολυπλοκότητα της κατασκευής
- Η έλλειψη προσαρμοστικότητας σε όλα τα αντικείμενα
- Το κόστος αγοράς τους
- Η ευθραυστότητα

Η ερευνητική κοινότητα προκειμένου να καλύψει τα παραπάνω μειονεκτήματα έχει δημιουργήσει ρομποτικά χέρια για μη δομημένα περιβάλλοντα με γνώμονα 3 κατευθύνσεις:

- Παθητική υποχωρητικότητα δηλαδή να διατηρεί χαμηλές δυνάμεις κατά την επαφή με το αντικείμενο και να επιτρέπει την παθητική παρέκκλιση του χεριού σε μη-δομημένα περιβάλλοντα.
- Προσαρμοστικότητα επενέργειας για να απλοποιηθεί ο έλεγχος του χεριού
- Στιβαρή κατασκευή προκειμένου να αποφευχθεί η καταστροφή του χεριού

2.1 Υποχωρητικότητα

Τα παλιότερα χρόνια η υποχωρητικότητα των ρομπότ θεωρούνταν ως μέρος του ελέγχου, όπου οι αισθητήρες και οι επενεργητές χρησιμοποιούνταν για να επιτύχουν την εύρεση της σχέσης μεταξύ δύναμης και παρέκκλισης.

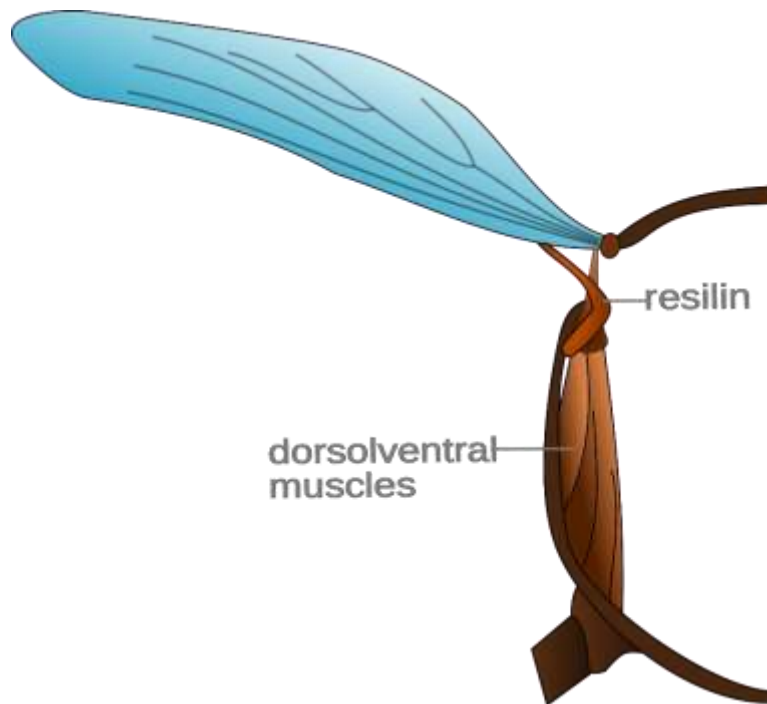
Όμως αυτή η εκτίμηση επιβάλλει την χρήση αισθητήρων θέσης/ταχύτητας και δύναμης/ροπής στις αρθρώσεις του ρομποτικού χεριού ή στο τελικό σημείο δράσης. Η χρήση των αισθητήρων δημιουργεί πολλά προβλήματα στον έλεγχο του ρομποτικού χεριού. Αρχικά οι αισθητήρες είναι εύθραυστοι και πολύ ακριβοί. Έπειτα σε μη-δομημένα περιβάλλοντα όπου επιδρούν συνεχώς ακούσιες επαφές δημιουργούνται μεγάλες δυνάμεις επαφής με αποτέλεσμα να κατευθυνόμαστε σε ασταθές έλεγχο. Μετά αν αναλογιστούμε πως οι αισθητήρες είθισται να τοποθετούνται στην εξωτερική επιφάνεια του χεριού καταλαβαίνουμε πόσο εύκολα είναι να φθαρούν ή και ακόμη να καταστραφούν [5].

2.1.1 Παθητική υποχωρητικότητα

Η παθητική υποχωρητικότητα, που επιτυγχάνεται μέσω ελατηρίων, και όχι αισθητήρων, στις αρθρώσεις των ρομπότ, προσφέρει πάρα πολλά πλεονεκτήματα που δεν μπορούν να επιτευχθούν με έλεγχο της δυσκαμψίας. Η παθητική υποχωρητικότητα μας εξασφαλίζει την ανάπτυξη μικρών δυνάμεων επαφής καθώς επιτρέπει την ανάπτυξη μεγάλων παρεκκλίσεων των αρθρώσεων. Έτσι μειώνονται αισθητά οι διαταραχές που μπορεί να προκαλέσουν ακόμα και καταστροφή του αντικειμένου όταν ο ο έλεγχος δυσκαμψίας αποτύχει. Η εξάλειψη των αισθητήρων που απαιτούνται στην ενεργητική υποχωρητικότητα μπορούν να οδηγήσουν σε αισθητή μείωση του κόστους κατασκευής. Ιδεατά, ο αναλυτικός σχεδιασμός του ρομποτικού χεριού που περιλαμβάνει βελτιστοποίηση κατασκευής και ελέγχου μπορεί να οδηγήσει ακόμα και στην εξάλειψη του παραδοσιακού βασισμένου σε αισθητήρες ελέγχου (sensor-based control) [5].

2.1.2 Παθητική υποχωρητικότητα εμπνευσμένη από την βιολογία

Στην φύση χρησιμοποιείται η παθητική υποχωρητικότητα σε αρθρώσεις. Υπάρχουν πολλά παραδείγματα, αλλά το πιο σύνηθες είναι οι αρθρώσεις στα πόδια όλων των ζώων (ως εξής: αρθροποδικά). Τα αρθροποδικά παρουσιάζουν ενδιαφέρον στις εφαρμογές της ρομποτικής καθώς ο μηχανολογικός σχεδιασμός τους είναι παρόμοιος με τον ρομποτικό σχεδιασμό. Ο ρομποτικός σχεδιασμός περιλαμβάνει άκαμπτους συνδέσμους με εύκαμπτες, επενεργούμενες αρθρώσεις. Αυτές οι αρθρώσεις συχνά χαρακτηρίζονται ως «ενεργές περιστροφικές» καθώς επιτρέπουν την παθητική κίνηση μεταξύ των 2 συνδέσμων. Είναι κατασκευασμένες από μια ελαστομερή πρωτεΐνη που ονομάζεται resilin και χρησιμεύει στην στεγάνωση της άρθρωσης αλλά παράλληλα παρέχει παθητική υποχωρητικότητα στο περιβάλλον, όπως στο ανώμαλο έδαφος, και δυναμική ελαστική συμπεριφορά [5].



Εικόνα 8: Resilin joint

2.2 Υποεπενεργητικότητα

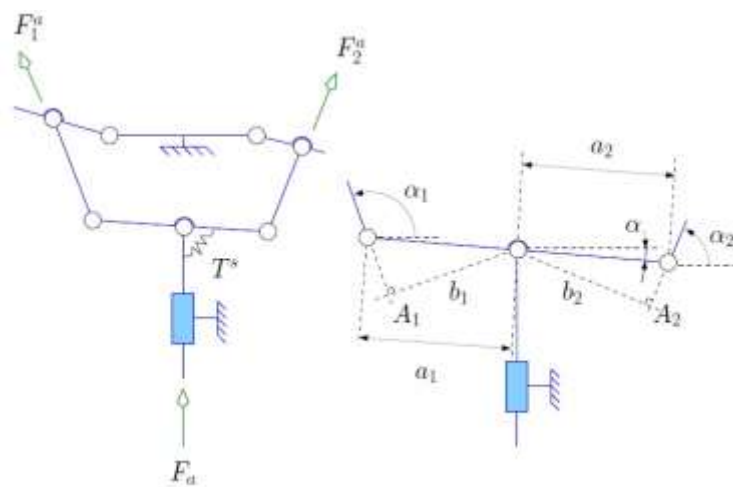
Μετά από χρόνια ερευνών πάνω σε σύνθετα, πλήρως- αρθρωτά ανθρωπομορφικά χέρια οι ερευνητές κινούνται στην κατεύθυνση όπου πολλές από τις λειτουργίες του χεριού μπορούν να επιτευχθούν με προσεκτική επιλογή συστημάτων ζεύξης αρθρώσεων, ώστε να μειωθεί ο συνολικός αριθμός των επενεργητών και της συνολικής πολυπλοκότητας του ρομποτικού χεριού. Έτσι έχουν κατασκευαστεί πολλά ρομποτικά χέρια υποεπενεργούμενα, έχοντας δηλαδή λιγότερους κινητήρες από βαθμούς ελευθερίας και χαρακτηρίζονται ως «ιδιο-προσαρμοστικά» (self-adaptable). Σε ένα υποεπενεργούμενο χέρι η κίνηση της ακραίας φάλαγγας μπορεί να συνεχιστεί ακόμα και μετά την επαφή των προηγούμενων φαλαγγών του δαχτύλου, έως ότου το δάχτυλο προσαρμοστεί παθητικά στο αντικείμενο. Άλλα πιο απλοποιημένα χέρια, κυρίως εμπορικά, ακολουθούν συγκεκριμένη κίνηση σύζευξης (fixed-motion coupling) μεταξύ των συνδέσμων, μειώνοντας τους βαθμούς ελευθερίας του μηχανισμού. Οι παραπάνω κατηγορίες που περιγράφηκαν είναι πιο οικονομικές στην κοστολόγησή τους, πιο οικονομικές του χεριού και φυσικά πιο ελαφριές δεδομένου πως έχουν λιγότερους επενεργητές [5].

Οι αρθρώσεις σύζευξης, που είναι απαραίτητοι στην υποεπενεργητικότητα, συχνά επιτυγχάνονται μέσω υποχωρητικότητας στην κατασκευή του χεριού. Η υποχωρητικότητα είναι πιο εύκολος τρόπος να δημιουργήσουμε αρθρώσεις σύζευξης, χωρίς να χρησιμοποιούμε οδοντωτούς τροχούς ή συνδέσμους σύζευξης. Πιο συγκεκριμένα αρθρώσεις σύζευξης με υποχωρητικότητα θεωρούνται οι ελαστικές αρθρώσεις (flexure joints). Η υποχωρητικότητα της

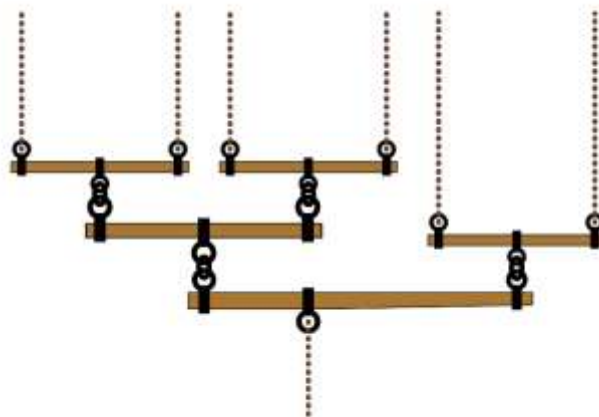
ελαστικής άρθρωσης επιτρέπει στα δάχτυλα να προσαρμόζονται στο αντικείμενο που επιθυμούμε να πιάσουμε μειώνοντας τις δυνάμεις επαφής.

Ένα ρομποτικό χέρι με μειωμένο αριθμό επενεργητών είναι αφενός ευκολότερο στην χρήση αλλά αφετέρου είναι και καταλληλότερο για μεταφορά πληροφοριών σε μη-δομημένα περιβάλλοντα.

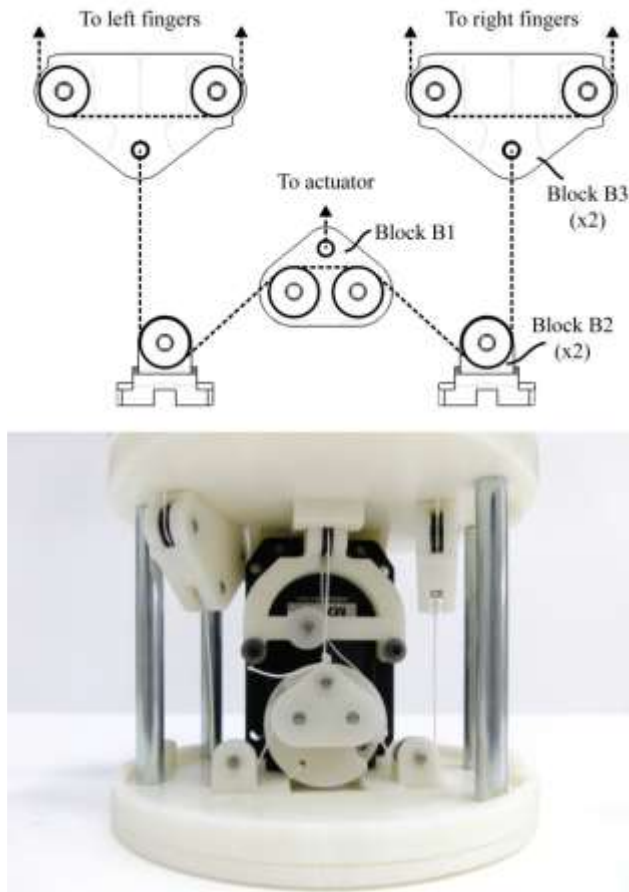
Η υποεπενεργητικότητα επιτυγχάνεται με την χρήση διαφορικών μηχανισμών οι οποίοι προσαρμόζονται στις παραπάνω προδιαγραφές. Οι διαφορικοί μηχανισμοί αποτελούνται από μπάρες, όπως το whiffletree ή το seesaw mechanism, από τροχαλίες ή από από τον συνδυασμό τους που αναφέρονται ως υβριδικά συστήματα [6].



Εικόνα 9: Seesaw Mechanism



Εικόνα 10: Whiffletree



Εικόνα 11: Υβριδικός μηχανισμός

2.2.1 Υποεπενεργούμενα χέρια

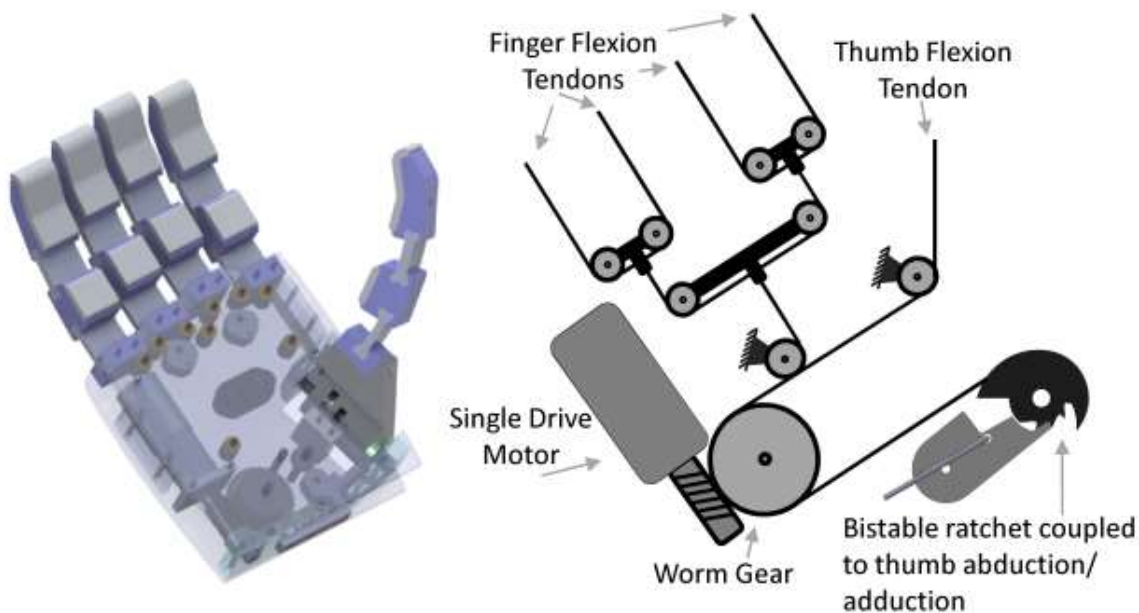
Για τους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω, τα τελευταία χρόνια, η ερευνητική κοινότητα εργάζεται πάνω σε ανθρωπομορφικά, χαμηλού-κόστους, υποεπενεργούμενα ρομποτικά χέρια. Στην παρούσα εργασία θα εξετάσουμε τα παρακάτω:

- Ανθρωπομορφικό χέρι του Yale University
- Μη-ανθρωπομορφικό χέρι του Model-T Yale University
- Ανθρωπομορφικό χέρι του Laval University
- Μη-ανθρωπομορφικό χέρι του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου

2.2.1.1 Ανθρωπομορφικό χέρι Yale University

Το ανθρωπομορφικό χέρι του Yale University κατασκευάστηκε στο Grab lab. Το συνολικό του βάρος είναι 350gr. Οι διαστάσεις του είναι οι μέσες ανθρωπομορφικές. Ο αριθμός των

αρθρώσεων του είναι 11, οι βαθμοί ελευθερίας είναι 11 και χρησιμοποιεί 1 επενεργητή. Έχει δύο φάλαγγες οι οποίες επιλέχθηκαν βάση μιας διαδικασίας βελτιστοποίησης προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι δυνάμεις στο άκρο του δαχτύλου. Ο αντίχειρας κινείται μυοηλεκτρικά, με ένα ξεχωριστό μηχανισμό, και έχει 4 διακριτές θέσεις προκειμένου να καλύπτει την πλειοψηφία των λαβών που επιχειρεί καθημερινά ο άνθρωπος. Έχει ένα διαφορικό μηχανισμό που είναι υβριδικός, δηλαδή συμπεριλαμβάνει τροχαλίες και μπάρες, και με αυτόν κινεί τα τέσσερα δάχτυλα. Ο διαφορικός μηχανισμός προσαρμόζεται στα αντικείμενα που πιάνει το χέρι και κινείται μέσω ενός κινητήρα DC λαμβάνοντας μυοηλεκτρικό σήμα [8].



Εικόνα 12: Ανθρωπομορφικό χέρι Yale University

2.2.1.2 Μη-ανθρωπομορφικό χέρι Model-T Yale University

Το μη-ανθρωπομορφικό χέρι Model-T του Yale University κατασκευάστηκε στο Grab lab. Το συνολικό του βάρος είναι 400gr. Οι διαστάσεις του είναι οι παρακάτω:

- Ύψος Βάσης: 75-90mm
- Πλάτος βάσης: 100mm
- Μήκος δαχτύλων: Ανθρωπομορφικό

Ο αριθμός των αρθρώσεων του είναι 8, οι βαθμοί ελευθερίας είναι 8 και χρησιμοποιεί 1 επενεργητή. Έχει δύο φάλαγγες οι οποίες επιλέχθηκαν βάση μιας διαδικασίας

βελτιστοποίησης προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι δυνάμεις στο άκρο του δαχτύλου. Έχει ένα διαφορετικό μηχανισμό που είναι υβριδικός, δηλαδή συμπεριλαμβάνει τροχαλίες και μπάρες, και με αυτόν κινεί τα τέσσερα δάχτυλα. Ο διαφορετικός μηχανισμός προσαρμόζεται σε σχέση με το αντικείμενο που πιάνουν τα δάχτυλα του χεριού. Το χέρι είναι open-source με σκοπό την διάδοση και την εξέλιξη του από όλους [7].

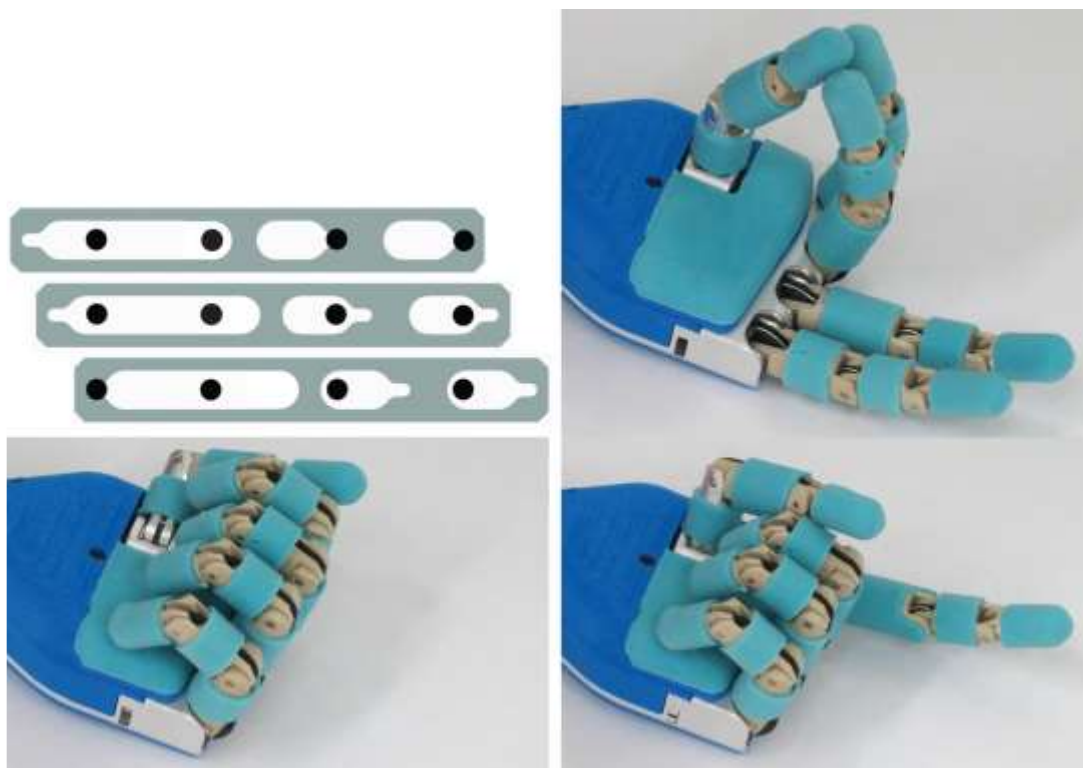
URL: <http://www.eng.yale.edu/grablab/openhand/> [15]



Εικόνα 13: Μη ανθρωπομορφικό χέρι Model T Yale University

2.2.1.3 Ανθρωπομορφικό χέρι του Laval University

Το ανθρωπομορφικό χέρι του Laval University κατασκευάστηκε στο Robotics Laboratory. Το συνολικό του βάρος και οι διαστάσεις του είναι οι μέσες ανθρωπομορφικές. Ο αριθμός των αρθρώσεων του είναι 15, οι βαθμοί ελευθερίας είναι 15 και χρησιμοποιεί 1 τένοντα για να κινήσει τα παραπάνω. Έχει ένα επιλεκτικό διαφορετικό μηχανισμό που μπορεί να επιλέγει 3 συγκεκριμένους συνδυασμούς δαχτύλων προκειμένου να καλύπτει το 80% των λαβών που επιχειρεί καθημερινά ο άνθρωπος. Ελέγχεται από την κίνηση του ώμου (body powered) και όχι από επενεργητή γεγονός που του προσδίδει αρκετά πλεονεκτήματα, όπως χαμηλή πολυπλοκότητα, χαμηλότερο βάρος, αντοχή στο νερό και χαμηλότερο κόστος [9].



Εικόνα 14: Ανθρωπομορφικό χέρι του Laval University

2.2.1.4 Μη-ανθρωπομορφικό χέρι του ΕΜΠ

Το μη-ανθρωπομορφικό χέρι του ΕΜΠ κατασκευάστηκε στο Control Systems Lab. Το συνολικό του βάρος και οι διαστάσεις του είναι οι μέσες ανθρωπομορφικές. Έχει 3 παραλλαγές που αφορούν τους αριθμούς των δαχτύλων, δηλαδή μπορεί να κατασκευαστεί με 2, 3 ή 4 δάχτυλα. Ο αριθμός των αρθρώσεων του εξαρτάται από τα πόσα δάχτυλα θα επιλέξει ο χρήστης, δεδομένου ότι κάθε δάχτυλο έχει 2 αρθρώσεις και 2 βαθμούς ελευθερίας. Έχει ένα διαφορετικό μηχανισμό που μπορεί να προσαρμόζεται στο αντικείμενο που πιάνει το χέρι. Ο διαφορετικός μηχανισμός διαφέρει από τους προηγούμενους που αναφέρθηκαν καθώς είναι ένας κυκλικός δίσκος. Το χέρι κινείται μέσω ενός σερβοκινητήρα, ενώ ελέγχεται με διάφορους τρόπους αναλόγως την εφαρμογή που χρησιμοποιείται. Για εφαρμογή προσθετικού μέλους ελέγχεται μυοηλεκτρικά. Το χέρι είναι open-source με σκοπό την διάδοση και την εξέλιξη του από όλους [10], [11].

URL: <http://www.openbionics.org/> [16]



Εικόνα 15: Παραλλαγή με 3 και 4 δάχτυλα μη-ανθρωπομορφικό χέρι ΕΜΠ



Εικόνα 16: Διαφορικός μηχανισμός κυκλικού δίσκου μη-ανθρωπομορφικό χέρι ΕΜΠ

3. Αλληλεπίδραση Ανθρώπου-Ρομπότ (HRI)

Για να μπορέσει να επιτευχθεί η κίνηση του ρομποτικού χεριού θα πρέπει να υπάρξει κάποιο σήμα από τον χρήστη. Για την εφαρμογή αυτού του σκοπού έχουν επικρατήσει τα ηλεκτρομυογραφικά σήματα αλλά πρόσφατες έρευνες κινούνται στην συνολική δραστηριότητα των μυών.

3.1 Αρχή λειτουργίας ηλεκτρομυογραφικού σήματος

Η προσέλευση αυτών των σημάτων μπορεί να εντοπιστεί στην ηλεκτρική δραστηριότητα σε επίπεδο κυττάρου. Όλα τα ζωντανά κύτταρα του σώματος είναι φορτισμένα αρνητικά στο εσωτερικό της κυτταρικής μεμβράνης τους, σε σχέση με το εξωτερικό τους. Αυτό το δυναμικό είναι αποτέλεσμα των διαφορετικών συγκεντρώσεων των ιόντων εκατέρωθεν της μεμβράνης. Τα νευρικά κύτταρα χρησιμοποιούν την εκπόλωση αυτού του δυναμικού ως μέσο επικοινωνίας (δυναμικό ενέργειας). Τα κινητικά νεύρα έχουν νευρώνες οι οποίοι διατρέχουν από την πρόσθια πλευρά της σπονδυλικής στήλης έως τις μυϊκές ίνες. Ο τελικός νευρώνας και η μυϊκή ίνα την οποία ελέγχει ονομάζονται κινητική μονάδα (single motor unit). Στους μυς του άνω άκρου είναι σύνηθες για τις κινητικές μονάδες να έχουν αρκετές εκατοντάδες μυϊκών ινών συνδεδεμένες με ένα νευρώνα. Όταν κατά την ενεργοποίηση του μυός, το δυναμικό ενέργειας διατρέχει τον νευρώνα έως την κινητική μονάδα, το δυναμικό ενέργειας του νεύρου προκαλεί την απελευθέρωση χημικών ουσιών στις νευρομυϊκές συνάψεις. Αυτές οι ουσίες προκαλούν ένα ηλεκτρικό εκπολωτικό κύμα, που διατρέχει τις μυϊκές ίνες της κινητικής μονάδας, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα τη σύσπαση όλων των μυϊκών ινών. Το ηλεκτρικό εκπολωτικό κύμα των μυϊκών ινών δημιουργεί ροή ηλεκτρικού ρεύματος στη γειτονική περιοχή της κινητικής μονάδας. Αυτά τα ρεύματα, καθώς ρέουν διαμέσου των ιστών του σώματος (που έχουν αρκετά μεγάλη αντίσταση), προκαλούν εμφάνιση διαφορών δυναμικού στους ιστούς. Οι ιστοί αυτοί συμπεριλαμβάνουν και το δέρμα, που περιβάλλει εξωτερικά το σώμα. Αφού η μυϊκή σύσπαση αφορά πολλές κινητικές μονάδες, οι οποίες εκπολώνονται επαναλαμβανόμενα και ασύγχρονα, το ηλεκτρικό δυναμικό στο δέρμα είναι μία περίπλοκη άθροιση της υποκείμενης ηλεκτρικής δραστηριότητας. Συνεπώς, το σήμα έχει ασυνήθιστη μορφή. Αυτό είναι το επιφανειακό μυοηλεκτρικό σήμα, το οποίο συχνά καλείται ηλεκτρομυογράφημα (EMG). Το πλάτος αυτού του ηλεκτρικού σήματος εξαρτάται περισσότερο από τα ρεύματα που πηγάζουν από τις κινητικές μονάδες, που είναι κοντινότερες στα ηλεκτρόδια. Εξαρτάται όμως επίσης, σε μικρότερο βαθμό και από πιο απομακρυσμένες κινητικές μονάδες, ακόμα και από μονάδες που βρίσκονται σε άλλους μυς. Γενικά, το πλάτος του επιφανειακού μυοηλεκτρικού σήματος μεγαλώνει με την αύξηση της μυϊκής σύσπασης, αν και η αύξηση αυτή δεν είναι γραμμική. Το επιφανειακό μυοηλεκτρικό σήμα είναι ένα εναλλασσόμενο δυναμικό, το οποίο έχει μάλλον τυχαίο χαρακτήρα. Συνεπώς, συνηθίζεται η περιγραφή του με στατιστικά μεγέθη. Πάντως, η μέση συχνότητα του σήματος κυμαίνεται περίπου στα 100 Hz. Συνήθως το εύρος συχνοτήτων του επιφανειακού ηλεκτρομυογραφήματος κυμαίνεται από 10 έως 300 Hz. Το πλάτος του σήματος εξαρτάται από τη μυϊκή δραστηριότητα. Το μυοηλεκτρικό σήμα στην επιφάνεια του δέρματος έχει σχετικά μικρό πλάτος (συνήθως από μερικές εκατοντάδες μV έως μερικά mV).

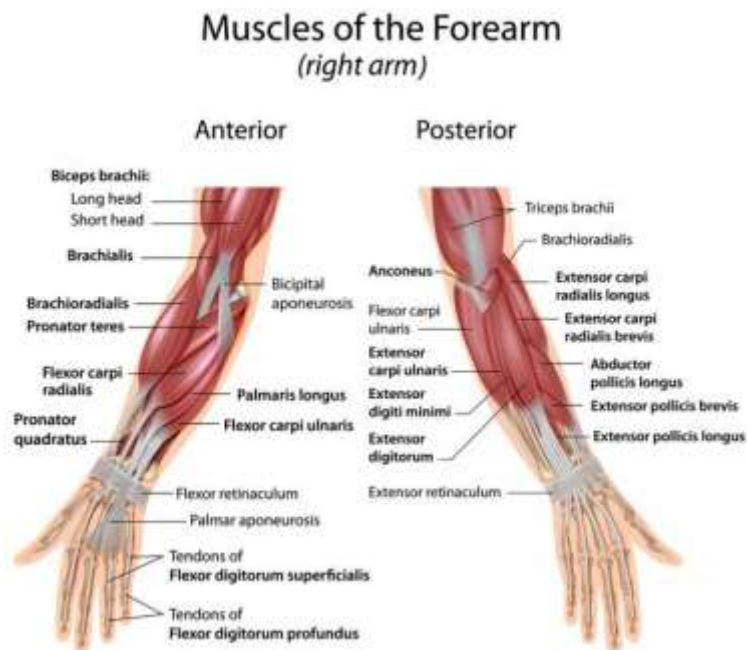
Αφού ο θόρυβος στους περισσότερους ενισχυτές είναι στο επίπεδο των μερικών mV, είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί μυοηλεκτρικό σήμα με πλάτος μικρό έως και 5-10 mV για την ενεργοποίηση προσθετικών άκρων. Η ενίσχυση που απαιτείται στις περιπτώσεις αυτές είναι της τάξης $10^4 - 10^5$.

3.2 Ηλεκτρομυογραφικά ηλεκτρόδια

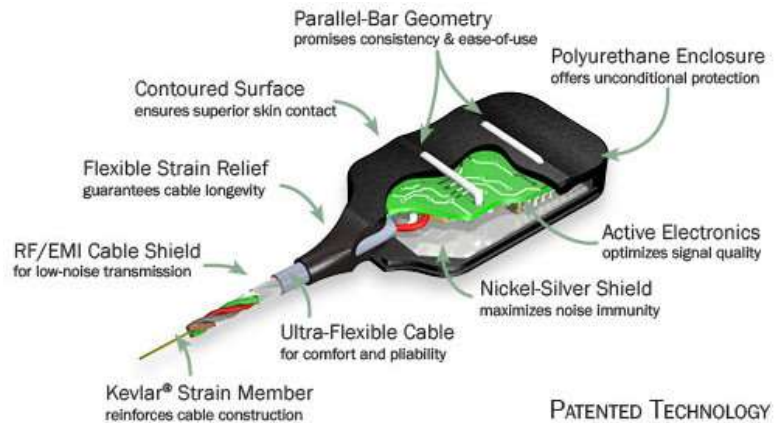
Υπάρχουν πολλών ειδών ηλεκτρόδια λήψης του ηλεκτρομυογραφικού σήματος, αλλά για την εφαρμογή σε προσθετικά μέλη χρησιμοποιούνται κυρίως ηλεκτρόδια ξηρού τύπου ή αλλιώς ενεργά ηλεκτρόδια.

Τα ηλεκτρόδια ξηρού τύπου έχουν 2 ακροδέκτες που καταγράφουν την διαφορά του μυοηλεκτρικού σήματος και ένα ακροδέκτη αναφοράς ο οποίος συνήθως τοποθετείται σε απόσταση για να μην επηρεάζεται από την δραστηριότητα του μυ που στοχεύουμε. Αυτά τα ηλεκτρόδια δεν απαιτούν την χρήση gel ή κολλητικών ουσιών και μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν μετά από οποιαδήποτε χρήση [12].

Το σημείο τοποθέτησης των ηλεκτρομυογραφικών ηλεκτροδίων καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την ποιότητα του σήματος. Τα ηλεκτρόδια έχουν πολύ υψηλές ικανότητες αναγνώρισης ηλεκτρικής δραστηριότητας, γεγονός που τα καθιστά ευαίσθητα στον θόρυβο από γειτονικούς μυς, έτσι θα πρέπει να γίνεται προσεκτική τοποθέτηση και γενικότερη καταγραφή του σήματος [13].



Εικόνα 17: Μυς που επενεργούν στην λειτουργία του χεριού



Εικόνα 18: Ηλεκτρόδιο ξηρού τύπου

3.3 Μειονεκτήματα ηλεκτρομυογραφικών διεπαφών και τρόποι αντιμετώπισης

Τα πιο σημαντικά προβλήματα που αντιμετωπίζουν οι διεπαφές ηλεκτρομυογραφικών σημάτων είναι:

- Πολυπλοκότητα ανθρώπινου μυοσκελετικού συστήματος
- Μη γραμμική σχέση μεταξύ της ανθρώπινης μυοηλεκτρικής δραστηριότητας και της κίνησης ή της δύναμης που τίθεται προς εκτίμηση
- Μυϊκή κόπωση
- Θόρυβος των σημάτων λόγω διαταραχής της θέσης των ηλεκτροδίων
- Μυϊκές συσπάσεις
- Ιδρώτας

Για την πολυπλοκότητα του ανθρώπινου μυοσκελετικού συστήματος, στο παρελθόν χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Ανάλυσης Κυρίων Συνιστωσών (PCA – Principal Components Analysis) για να ερευνηθούν τόσο η κινηματική του ανθρώπινου χεριού όσο και οι μυϊκές συνέργειες. Μία ακόμα δυσκολία την οποία αντιμετωπίζουν οι ερευνητές στο πεδίο των ηλεκτρομυογραφικών διεπαφών, είναι η μη-γραμμική σχέση μεταξύ των μυοηλεκτρικών ενεργοποιήσεων και της ανθρώπινης κίνησης. Για να ξεπεράσουν αυτό το πρόβλημα, η πλειοψηφία των ερευνητών αποφεύγει να αποκωδικοποιεί μία συνεχή αναπαράσταση της ανθρώπινης κίνησης, εστιάζοντας σε μία διακριτή προσέγγιση όπως ο κατευθυντήριος έλεγχος ενός ρομποτικού συστήματος ή ο ηλεκτρομυογραφικός έλεγχος ενός πολυδάκτυλου χεριού σε μία σειρά από διακριτές διαμορφώσεις/θέσεις.

Σχετικά με τη προσέγγιση του συνεχούς ηλεκτρομυογραφικού ελέγχου, διάφορα μοντέλα έχουν χρησιμοποιηθεί ώστε να παρέχουν εκτιμήσεις για την βασισμένη στις μυοηλεκτρικές ενεργοποιήσεις ανθρώπινη κίνηση. Κάποιες από αυτές είναι, το μυοσκελετικό μοντέλο Hill το οποίο είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο μοντέλο, τα μοντέλα χώρου κατάστασης, Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (ANN - Artificial Neural Networks) και παλινδρομητές βασισμένοι σε Μηχανές Διανυσματικής Υποστήριξης (SVM - Support Vector Machines) [14].

Βιβλιογραφία

- [1] Joseph T. Belter, J. Segil, Aaron M. Dollar and R.F. Weir, “The Mechanical Design and Performance Specifications of Anthropomorphic Prosthetic Hands: A Review”, Journal of Rehabilitation Research and Development, vol. 50(5), pp.599-618, 2013.
- [2]Bebionic3 Technical information, RSLLIT317 Issue 3 2013, Available:
http://bebionic.com/distributor/documents/bebionic3_Tech_Manual_web.pdf.
- [3] i-limb ultra-revolution User Manual, MA01141: Issue No. 2, September 2014, Available:
<http://www.touchbionics.com/sites/default/files/files/i-limb%20ultra%20revolution%20user%20manual%20September%202014.pdf>.
- [4] <http://vincentsystems.de/en/prosthetics/vincent-evolution-2/>, 2015, [Online; accessed 14-January-2015].
- [5] Aaron M. Dollar, “Design Principles for Robust Grasping in Unstructured Environments, Ph.D. Dissertation”, Harvard University, Division of Engineering and Applied Sciences, October, 2006.
- [6] Birglen, L. and Gosselin, C. “Force Analysis of Connected Differential Mechanisms: Application to Grasping”, International Journal of Robotic Research, 25, 1033–1046, 2006.
- [7] Raymond R. Ma, Lael U. Odhner and Aaron M. Dollar, “A Modular, Open-Source 3D Printed Underactuated Hand”, in IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2013), Karlsruhe, Germany, May 6-10, 2013.
- [8] Joseph T. Belter and Aaron M. Dollar, “Novel Differential Mechanism Enabling Two DOF from a Single Actuator: Application to a Prosthetic Hand”, in IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR), Seattle, Washington USA, 2013.
- [9] M. Baril, T. Laliberte, C. Gosselin, and F. Routhier, “On the design of a mechanically programmable underactuated anthropomorphic prosthetic gripper,” ASME Journal of Mechanical Design, vol. 135, no. 12, 2013.
- [10] Agisilaos G. Zisimatos, Minas V. Liarokapis, Christoforos I. Mavrogiannis and Kostas J. Kyriakopoulos, “Open-Source, Affordable, Modular, Light-Weight, Underactuated Robot Hands”, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Chicago (USA), 2014.
- [11] Minas V. Liarokapis, Agisilaos G. Zisimatos, Melina N. Bousiou and Kostas J. Kyriakopoulos, “Open-Source, Low-Cost, Compliant, Modular, Underactuated Fingers: Towards Affordable Prostheses for Partial Hand Amputations”, 36th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), Chicago (USA), 2014.

[12] Γεώργιος Ν. Κούστας, “Επεξεργασία και Αναγνώριση Μυοηλεκτρικών Σημάτων για Οδήγηση Εξωσκελετικού Συστήματος της Άρθρωσης του Ώμου”, Diploma thesis, Control Systems Lab, School of Mechanical Engineering, National Technical University of Athens, 2004.

[13] Eleanor Criswell, EdD, “Cram's Introduction to Surface Electromyography”, Second Edition, Jones & Bartlett Learning, 2011.

[14] Minas V. Liarokapis, “EMG Based Interfaces for Human Robot Interaction in Structured and Dynamic Environments”, PhD Dissertation, Control Systems Lab, School of Mechanical Engineering, National Technical University of Athens, July 2014.

[15] <http://www.eng.yale.edu/grablab/openhand/>, 2015, [Online; accessed 14-January-2015].

[16] <http://www.openbionics.org/>, 2015, [Online; accessed 14-January-2015].